

Jaakko Tervo

ISKUNVAIMENNINDYNAMOMETRI

ISKUNVAIMENNINDYNAMOMETRI

Jaakko Tervo
Opinnäytetyö
Syksy 2015
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, auto- ja kuljetustekniikka

Tekijä: Jaakko Tervo
Opinnäytetyön nimi: Iskunvaimennindynamometri
Työn ohjaaja: Mauri Haataja
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2015 Sivumäärä: 38 + 20 liitettä

Opinnäytetyössä suunniteltiin ja toteutettiin iskunvaimennindynamometri. Dynamometrillä mitattiin henkilöauton pyöräntuentaan kohdistuneen koneellisesti tuotetun värähtelyn aiheuttamat pysty akselin suuntaiset siirtymien ja kiihtyvyyksien muutokset ajoneuvon pyörätuennassa ja korissa. Työn tavoitteena oli tutkia, voiko henkilöauton jousituksen kunnon määrittää pyöräntuennan ja korin kiihtyvyyden ja siirtymän perusteella.

Menetelmä perustuu värähtelymekaniikan harmoniseen ja pakotettuun värähdysliikkeeseen. Pyöräntuentaan kohdistunut värähtely aiheutettiin EUSAMA-pyöräkosketuksen testauslaitteella. Poikkeamat tasapainoasemista ja kiihtyvyydet mitattiin laser- sekä kiihtyvyyssantureilla ajoneuvon korista, pyöräntuennasta ja testilaitteen värähtelylevystä. Tiedonkeruu tehtiin MoTeC ADL 2 -tiedonkeruulla, minkä jälkeen tulokset analysoitiin MoTeC i2 Pro -analysointiohjelmistolla. Mittaukset tehtiin yhdelle henkilöautolle, jonka jousitusratkaisu oli iskunvaimennin ja kierrejousi kullakin pyörällä. Mittaukset tehtiin kunnossa olevilla ja huonokuntoisilla iskunvaimentimilla.

Lopputuloksina saatiin kiihtyvyyksien ja siirtymien muutokset uusien ja käytettyjen jousituksen osien välillä. Kiihtyvyyksien mittauksen tuloksille tehdyn nopean Fourier'n muunnoksen jälkeen oli havaittavissa korkeataajuisien värähtelyiden väheneminen uusilla iskunvaimentimilla. Iskunvaimentimen kunto on siis mahdollista määrittää niin, että se on autoon asennettuna.

Asiasanat: jousitus, värähtelyt, etäisyydenmittaus, anturit, EUSAMA

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering, Vehicle and
Transport Engineering

Author: Jaakko Tervo

Title of thesis: Dynamometer for Shock Absorbers

Supervisor: Mauri Haataja

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2015 Pages: 38 + 20
appendices

In this final thesis, a suspension dynamometer was designed and put into effect. The dynamometer was used to measure changes of vertical acceleration, motion and velocity which were produced by mechanically oscillating the suspension with the EUSAMA suspension tester. The main goal for the thesis was to find out if it is possible to define the condition of the suspension by analysing the motions, accelerations and velocities of the body and suspension itself.

The method is based on the harmonic and forced oscillator (classical mechanics). The vertical motions and accelerations were measured with laser position transducers and acceleration sensors. Data acquisition was made with MoTeC ADL 2 (Advanced Dash Logger 2) and the data was analysed with MoTeC i2 Pro analysing program. The measurements were made to one passenger car which had normal coil springs and shock absorbers. Both operational and inoperative shock absorbers were used and measured.

Results show accelerations and motions between operational and inoperative shock absorbers. In reference to the results, this dynamometer layout can be used to measure the condition of the suspension without dismantling the suspension.

Keywords: suspension, oscillation, distance measurement, sensors, EUSAMA

ALKULAUSE

Mahdollisuudesta tämän opinnäytetyön tekemiseen tahdon kiittää perhettäni, johon kuuluvat puolisoni Julia sekä poikani Leevi ja Luukas. Ohjaavalle opettajalle, professori Mauri Haatajalle kuuluu suuri kiitos opastamisesta työn aikana. Lisäksi tahdon kiittää Oulun ammattikorkeakoulun konetekniikan laboratorioden henkilökuntaa: erikoisasiantuntija Arto Lehtosta, laboratorioinsinööri Janne Ilo-mäkeä, projektisuunnittelija Ray Färmiä sekä laboratorioteknikko Jari Mahla-kaarta.

Oulussa 18.11.2015

Jaakko Tervo

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 TYÖN TEOREETTINEN SISÄLTÖ	10
2.1 Värähtelyn peruskäsitteitä	10
2.2 Jousitus	11
2.2.1 Kierrejousi	11
2.2.2 Iskunvaimennin	11
2.3 Ajoneuvon korin ja pyörätuennan värähtely	12
2.4 Värähtelevä alusta	14
3 HEILAHDUKSENVAIMENTIMIEN TESTAUS	15
3.1 Säädökset	15
3.2 EUSAMA	15
3.3 Amplitudimenetelmä	16
4 KIIHTYVYYSSANTUREIDEN VALMISTAMINEN	18
4.1 Elektroniikka	18
4.2 Kotelointi	19
4.3 Kokoonpano ja testaus	19
5 MITTAUSJÄRJESTELYT	22
5.1 Tutkittava ajoneuvo	22
5.2 Mittausmenetelmä	22
5.3 Mittausvälineet	27
5.4 Tiedonkeruu	27
5.4.1 ADL 2:n alustus	27
5.4.2 Johtosarjan valmistus	28
5.4.3 Konfigurointi ja kalibrointi	28
5.5 Virheen arviointi	29
6 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY	31

7 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	36
LIITTEET	38

SANASTO

ADL 2 Tiedonkeruulaite / näyttö

EUSAMA Euroopan iskunvaimenninvalmistajien yhdistys

FFT nopea Fourier'n muunnos

1 JOHDANTO

Työn lähtökohtana on saada tarkkaa tietoa ajoneuvon jousituksen kunnosta. Kuluttajamarkkinoilla on iskunvaimennindynamometrejä, joilla voidaan määrittää yksittäisien, irrallaan olevien iskunvaimentimien vaimennusarvoja. Näitä laitteita käytetään useimmin autourheilussa käytettävien säädettävien iskunvaimentimien ominaisuuksien tutkimiseen ja säätöön.

Katsastustoimipisteiden käytössä oleva laite mittaa pyörän kosketusta tiehen eri värähtelytaajuuksilla. Pyörän kosketukseen tiehen vaikuttavat ajoneuvon kierrejouset, iskunvaimentimet, rengasilmanpaine ja pyörätuennan rakenneratkaisut.

Työn tavoitteena on tutkia, onko mahdollista määrittää henkilöauton iskunvaimentimien kunto niin, että ne ovat kiinteästi asennettuna ajoneuvoon. Mittaukset suoritetaan samalla periaatteella toimivalla laitteella, jota katsastustoi- mipaikat käyttävät, mutta laitteen antamien tulosten lisäksi tavoitteena on tutkia laitteen värähtelylevyn, pyörätuennan ja ajoneuvon korin siirtymä ja kiihtyvyys eri värähtelytaajuuksilla. Mitattujen arvojen avulla on mahdollista määrittää esimerkiksi liikenopeus ajoneuvon pyörätuennalle ja korille.

Tällä opinnäytetyöllä ei ole erillistä tilaajaa. Kyseessä on työn tekijän oma innovaatio iskunvaimentimien testauksen kehittämisestä ja tieturvallisuuden parantamisesta.

2 TYÖN TEOREETTINEN SISÄLTÖ

Värähtely on yleinen luonnonilmiö. Koneissa esiintyy värähtelyitä pyörivien osien epätasapainon takia tai edestakaisin liikkuvien osien vaikutuksesta. (1, s. 1.) Ajoneuvojen jousitus on suunniteltu vaimentamaan mekaanista värähtelyä mahdollisimman paljon. Ihanteellinen jousitus vaimentaisi värähtelyt täysin, mutta tämä on käytännössä haastavaa toteuttaa. Ajoneuvo ei saisi heilahdella minäkään akselinsa suunnassa, eivätkä pyöräkuormat saisi muuttua epätasaisella pinnalla ajettaessa millään nopeudella. Kompromissina suunnittelussa tyydytäänkin siihen, että pyöräkuormat ja värähtelyt pysyvät mahdollisimman pieninä koko ajoneuvon nopeusalueella. (2, s. 8.)

2.1 Värähtelyn peruskäsitteitä

Mekaanisen systeemin toistuvaa liiketilaa, joka toistuu joko täysin tai lähes samanlaisena tietyn määräajan kuluttua, kutsutaan värähtelyksi. Värähtelevään systeemiin kuuluu energiaa varastoivia ja vaimentavia osia. Kimmoenergiaa varastoivia osia ovat jouset ja materiaalin kimmoisuus. Liike-energiaa varastoitavat massat ja hitausmomentit. Lisäksi systeemissä on vaimentavia osia, jotka muuntavat systeemin mekaanista energiaa toiseen muotoon. Näistä esimerkiksi mainittakoon vaimentimet ja kitka. (1, s. 1 - 2.)

Värähtelymekaniikka jakaantuu kahteen eri ryhmään, ominaisvärähtelyyn ja pakkovärähtelyyn. Ominaisvärähtelyn tunnusmerkkinä on, että kun systeemi poikkeutetaan tasapainoasemastaan, pyrkivät palautusvoimat kimmovoima ja painovoima saattamaan sen takaisin tasapainoon. Systeemi saavuttaa tasapainoaseman nolasta poikkeavalla nopeudella, mikä vie systeemin jälleen pois tasapainosta. (1, s. 2.)

Kun systeemiin vaikuttaa palautusvoimien lisäksi muita ulkoisia voimia, sanotaan syntyvää liikettä pakotetuksi liikkeeksi. Pakkovoimat ovat usein jaksollisia, joten syntyvä liikekin on jaksollista. Tätä liikettä kutsutaan pakkovärähtelyksi. (1, s. 2.)

2.2 Jousitus

Ajoneuvon jousituksen tehtävänä on edistää pyörän ja tien välistä kontaktia. Kun pyörä pysyy kiinni tien pinnassa, se edistää myös pitoa tiehen ja pitoa jarrutustilanteessa. Jousitus parantaa myös ajoneuvon ajomukavuutta. (3, s. 3.) Tässä luvussa käsitellään kierrejousen ja iskunvaimentimen ominaisuuksia. Ajoneuvoissa on käytössä myös monia muita jousitusrakenteita, mutta tässä työssä keskitytään kierrejousen ja iskunvaimentimen yhdistelmään.

Jousituksen hyvyttä voidaan tarkastella monella tavalla. Tarkastelu voidaan keskittää ajomukavuuteen, jolloin halutaan värähtelyjen mahdollisimman hyvää vaimenemista. Hyvyttä voidaan myös tarkastella turvallisuusnäkökulmasta, jolloin pyörän mahdollisimman hyvä pysyminen kiinni tien pinnassa on olennaista.

2.2.1 Kierrejousi

Iskunvaimennin ei voi kannatella ajoneuvon korin massaa, vaan tätä varten ajoneuvossa on myös kierrejousi. Kierrejouset muodostavat ajoneuvon renkaan kosketuksen tien pintaan. (3, s. 4 - 5.) Tavallisen kierrejousen joustokuvaaja on lineaarinen (kuormitusvoima joustomatkan funktiona). Tavallisen kierrejousen jousilangan vahvuus ja kierrenousu on vakio koko jousen matkalla. (4, s. 128.)

Kierrejousen tekeminen progressiiviseksi poistaa jousituksesta ns. pintakovuuden, minkä jälkeen kyseinen jousi reagoi normaalia kierrejousta nopeammin tienpinnan aiheuttamiin herätteisiin. Kierrejousesta saadaan progressiivinen esimerkiksi tekemällä se kartion muotoon, käyttämällä kartiomaista jousilankaa tai tekemällä siitä muuttuvanousuinen. Superprogressiivinen kierrejousi on muuttuvanousuinen, kartiolankainen kartiokierrejousi.

2.2.2 Iskunvaimennin

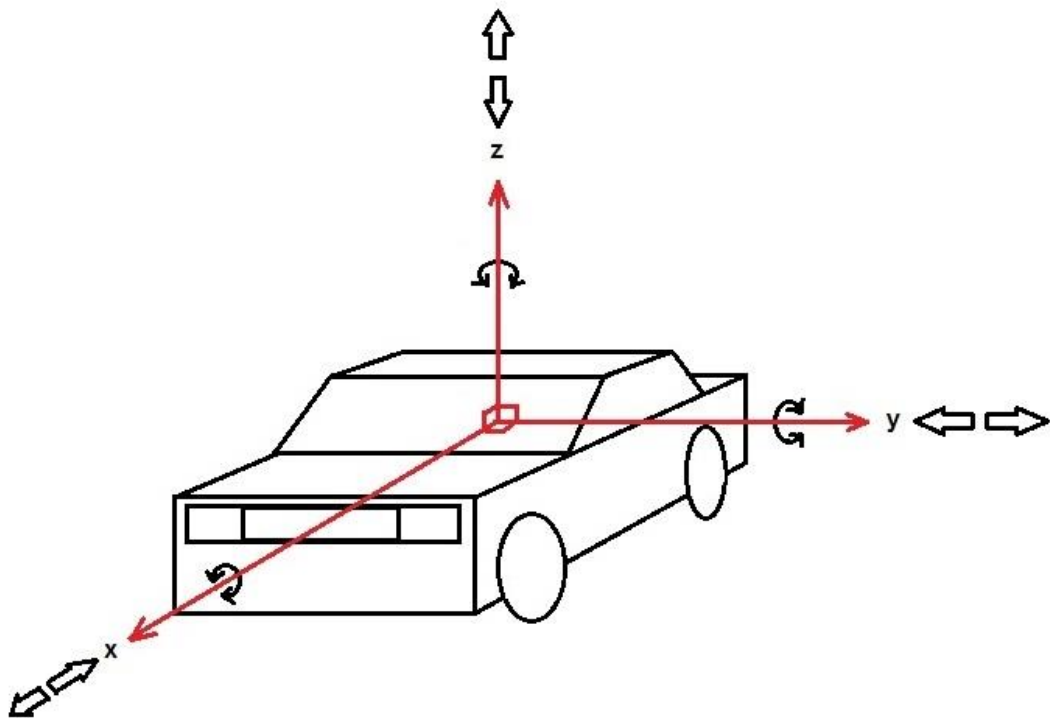
Yleisimmissä ajoneuvokaluston iskunvaimentimissa käytetään väliaineena hydraulinestettä. Niin kaasuihin kuin hydraulisiin iskunvaimentimissa mäntä liikkuu hydraulinesteellä täytetyn putken sisällä. Mäntässä olevat reiät päästävät

hydraulinesteen siirtymään vaimentimen putken ylä- ja alaosan välillä, jolloin värähtely vaimenee. (4, s.10 - 12.)

Kun hydraulineeste virtaa nopeasti iskunvaimentimessa, saattaa se alkaa vaah-
toamaan. Tämä heikentää vaimennuksen tehoa oleellisesti. Kaasuiskunvaimen-
timessa öljyn vaahtoaminen on estetty kelluvan männän avulla, jonka toisella
puolella on korkeapaineinen typpikaasu ja toisella puolella hydraulineeste, jossa
mäntä liikkuu. Typpi painaa kelluvaa mäntää tietyllä paineella, joka vastaavasti
paineistaa hydraulineesten. Kun hydraulineeste on paineistettu, tämä estää te-
hokkaasti nesteen vaahtoamista. (4, s. 12.)

2.3 Ajoneuvon korin ja pyörätuennan värähtely

Ajotilanteessa, kun ajoneuvon jousitus toimii ulkoisten herätteiden aiheuttama-
na, ajoneuvon kolmen pääakselin suunnassa voi esiintyä monia erilaisia edes-
takaisia heilahdusliikkeitä. Heilahdusliikkeet on esitetty kuvassa 1. (2, s. 8.)



KUVA 1. Ajoneuvon korin liikkeet

Yleisimmät heilahtelumuodot ovat mekaanisia pystyheilahteluja. Näistä heilahteluista on mitattavissa ja laskettavissa seuraavia suureita (2, s. 9):

- heilahdusmatka $y = y(t)$
- heilahdusnopeus $v = \frac{dy}{dt}$
- heilahduskiihtyvyys $a = \frac{dv}{dt}$
- heilahdussysäys $r = \frac{da}{dt}$, sekä
- heilahdustaajuus $f = \frac{1}{T}$.

Boschin autoteknillisen taskukirjan mukaan ajomukavuuden kannalta määräävä heilahdustekijä on korin pysty akselin suuntainen kiihtyvyys (5, s. 474). Kun ajatellaan auton pysty akselin suuntaista värähtelyä, voidaan se kuvitella kullekin pyörälle kaksimassasysteeminä (kuva 2), johon kuuluvat

m_1 = jousitettu massa (kori)

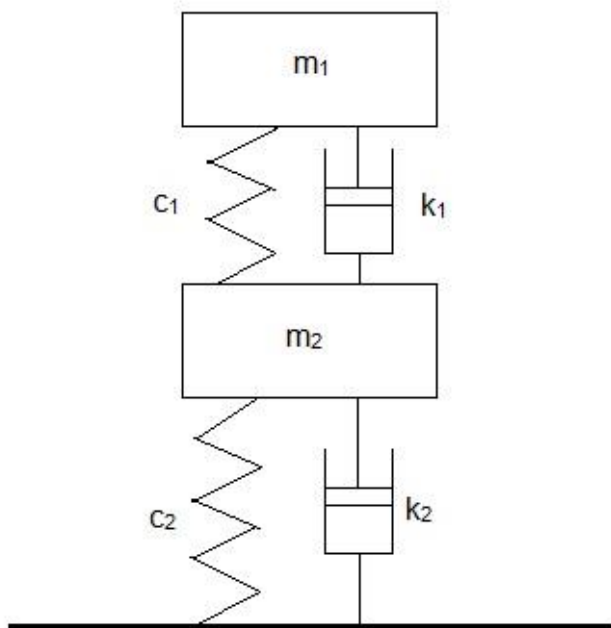
m_2 = jousittamaton massa (pyöräntuenta)

c_1 = kierrejousen jäykkyysskerroin

c_2 = renkaan jäykkyysskerroin

k_1 = iskunvaimentimen vaimennuskerroin, sekä

k_2 = renkaan vaimennuskerroin. (2, s. 6.)



Kuva 2. Kaksimassasysteemi (2, s. 6.)

Kaksimassasysteemi koostuu pyöräntuennan massasta sekä korin kyseiselle pyörälle aiheuttamasta massasta. Pyörän ja kiinteän pinnan välillä on ilmakumi- renkaan aiheuttama jousto ja vaimennus. Vastaavasti pyöräntuennan ja korin välillä on iskunvaimentimen aiheuttama vaimennus ja kierre- tai lehtijousen aiheuttama jousto.

Kuvan 2 mukaan ajoneuvon jousituksessa on kaksi joustoa ja kaksi vaimenninta, mutta jousi-massa-vaimenninsysteemejä on todellisuudessa paljon enemmän. Näistä mainittakoon esimerkkeinä moottorin ja korin väliset joustavat tuentapisteet sekä matkustajien ja istuimien muodostamat vastaavat systeemit. Kaikkien näiden systeemien käsittely olisi hankalaa, koska kyseessä olisi tällöin monimassasysteemi. (2, s. 7.) Tässä työssä systeemiä tutkitaan kuvan 2 esittämässä yksinkertaistetussa muodossa.

2.4 Värähtelevä alusta

Kun kierrejousella ja iskunvaimentimella vaimennettu massa asetetaan harmonisesti värähtelevän alustan päälle, syntyy systeemiin alustan värähtelyn aiheuttama pakkovärähtely. Matemaattisesti tarkasteltuna, alustan asemaa y ajan hetkellä t voidaan kuvata funktiolla (kaava 1).

$$y(t) = A \cdot \sin(B \cdot t)$$

KAAVA 1

A = amplitudi

B = kulmataajuus

Pakkovoiman amplitudi on em. tilanteessa vakio. Massassa tapahtuvaan värähtelyyn muodostuu massahitausmomentin, kierrejousen jouston, tukivarsien kiinnityspisteiden elastisuuden ja iskunvaimentimessa tapahtuvien kitkahäviöiden vuoksi vaihesiirto (6). Massan asemaa ajan suhteen voidaan kuvata kaavassa 2 esitetyllä funktiolla.

$$y_{massa}(t) = A' \cdot \sin(B' \cdot t + C)$$

KAAVA 2

C = vaihesiirto

3 HEILAHDUKSENVAIMENTIMIEN TESTAUS

3.1 Säädökset

Katsastustoimipaikalla tulee olla henkilö- ja pakettiautojen heilahtelunvaimentimien testauslaite, jolla testataan kaikki M1- ja N1-luokan ajoneuvot, joiden korkeus on alle 245 cm ja kokonaismassa alle 2 500 kg. Laitteen käyttö katsastusasemilla on tullut pakolliseksi 1.3.2004. Liikenteen turvallisuusvirasto on asettanut tietyt vaatimukset heilahdusvaimentimien testauslaitteelle katsastuskäyttöön. Sen tulee olla koneellisesti toimiva laite, joka aiheuttaa ajoneuvon pyörään edestakaisen, pystysuuntaisen taajuudeltaan muuttuvan liikkeen. Hyväksyttävinä mittausperiaatteina ovat ainakin EUSAMA ja amplitudimenetelmä. (7.)

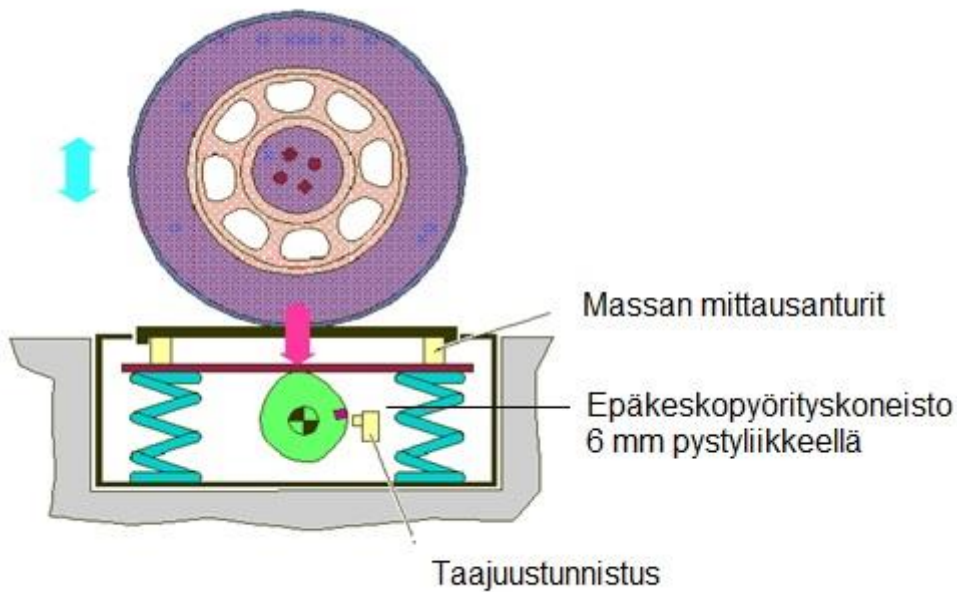
3.2 EUSAMA

EUSAMA-testauslaite toimii siten, että se aiheuttaa ajoneuvon kaksimassasysteemiin koneellisesti pakkovärähtelyn, jonka taajuus alkaa 25 Hz:stä ja loppuu 0 Hz:iin. Pakkovärähtely saadaan aikaan liikuttamalla ajoneuvon pyörän alla olevaa levyä ylä-alasuunnassa 6 mm:n matkalla. Laitteessa on kaksi värähtelylevyä kummallekin akselilla olevalle pyörälle, joten ajoneuvosta voidaan testata yksi akseli kerrallaan. (8.)

Ajoneuvon ollessa testauslaitteen levyjen päällä laite aiheuttaa värähtelyn yhteen pyörään kerrallaan, käyden testijakson läpi. Laite mittaa ajoneuvon pyöräkuorman testijakson alussa ja seuraa sitä värähtelyjakson aikana, jonka päätyttyä laskee testijakson aikaisen pyöräkuorman prosenttiosuutena paikallaan mitatusta. Pyöräkuormitus on alimmillaan, kun ajoneuvon resonanssitaajuus on mittalaitteen värähtelytaajuus. (8.)

EUSAMA-testilaitteen tuottamasta mekaanisesta energiasta osa muuttuu toiseen muotoon ilman- ja muiden vastuksien aiheuttamina, kun tarkastellaan pyöräntuennassa tapahtuvaa värähtelyä. Vastuksina voidaan tässä ajatella ilmakumirenkaan rungon ja kumin sekä renkaassa olevan ilmanpaineen aiheuttama vaimennusta. Rengas voidaan ajatella myös osittain jouseksi, johon varas-

toituu kimmoenergiaa. Pyöräntuennan värähtely jatkuu samanmuotoisena kuin pakkovärähtelijän tuottama värähtely, mutta se on vaimentunut. Tapausta voitaisiin käsitellä vaimenevana harmonisena värähtelynä, jos pyöräntuenta poikeutettaisiin tasa-painoasemastaan ja sen annettaisiin tämän jälkeen värähdellä vapaasti. EUSAMA-testilaitteen rakenne on esitetty kuvassa 3. (9.)



KUVA 3. EUSAMA-testilaitteen rakenne (9)

Yli 45 % oleva EUSAMA-arvo merkitsee hyvää vaimennusta ja alle 25 % heikkoa. Kevyellä akselilla saattaa arvo kuitenkin olla jopa alle 20 %, vaikka vaimennus on täysin kunnossa. EUSAMA-arvoon vaikuttavat pyörätuennan komponenttien kunto ja rengasilmanpaine. Alhaisempi rengasilmanpaine parantaa testitulosta. Ajoneuvon alustaan tehdyt muutokset kuten jäykempi jousitus ja vaimennus, matalaprofiiliset renkaat saattavat johtaa alhaiseen tulokseen, vaikka vaimentimet ovat kunnossa. Eri valmistajien testilaitteilla saadut EUSAMA-arvot poikkeavat toisistaan laskentamenetelmien erojen ja mitta-antureiden teknisten erojen vuoksi. (10.)

3.3 Amplitudimenetelmä

Amplitudimenetelmää kutsutaan toiselta nimeltään myös Boge-menetelmäksi. Kuten EUSAMA, tämäkin menetelmä testaa yhden pyörän kerrallaan. Amplitu-

dimenetelmässä testilaitteen levy värähtelee 16 Hz:n taajuudella ja sen ylä-
alasuuntainen liike on 9 mm. Värähtelylevy vapautetaan 16 Hz:n koneellisesta
värähtelystä, jonka seurauksena se pääsee liikkumaan vapaasti. Pyörätuennan
vaimenevan värähdysliikkeen tietyllä taajuudella saavutetaan auton jousituksen
resonanssitaajuus. Värähtelyn amplitudi mitataan resonanssitaajuudella väräh-
telylevyn pystysuuntaisesta liikkeestä. Testauksen tulos saadaan sekä millimet-
reinä, että prosentuaalisena vaimenemiskyynä. (11, s. 9 - 10.)

Mitä suurempi on liikematka, sitä heikompi on vaimennus. Amplitudimenetelmä
on tunteettomampi pyörätuennan kunnolle ja alustan muutoksille, koska se mit-
taa vaimentimien tehokkuutta. Valmistajien antamien ohjearvojen mukaan vai-
mentimien tehokkuus on heikko, jos painavalla ajoneuvolla mittausarvo on yli 50
mm ja kevyellä yli 70 mm. (10.)

Amplitudimenetelmällä mitatut arvot muunnetaan usein EUSAMA-arvoiksi sak-
salaisen katsastusorganisaatio Dekran kehittämällä laskentakaavalla (kaava 3).
(10.)

$$EUSAMA - arvo = \frac{(Akselimassa[kg]+240) \cdot Boge-mittaustulos [mm]}{680} \quad KAAVA 3$$

Laskennalliseen EUSAMA-arvoon tulee epätarkkuutta akselimassan kasvaes-
sa. Epätarkkuutta tulee myös siitä, jos ajoneuvo ei ole keskittynyt hyvin värähte-
lylevyille. (10.)

EUSAMA- ja amplitudimenetelmissä vertaillaan eroa samalla akselilla olevien
pyörien tulosten välillä. Eroa ei saisi olla yli 15 - 20 %. Menetelmien antamat
tulokset eivät kuitenkaan ole keskenään vertailukelpoisia. Tuloksiin vaikuttavat
huomattavasti eri automallien välillä olevat jousituksen ja pyöräntuennan raken-
teelliset erot. Testilaitteiden valmistajat antavat omat ohjearvot mittaustulosten
tulkintaan. (11, s. 10; 14.)

4 KIIHTYVYYSANTUREIDEN VALMISTAMINEN

Mittauksien suorittamista varten tarvittiin kiihtyvyyssanturit, joiden näytteenotto-taajuus, tarkkuus ja mitta-alue olisi riittävä. Koska aiempien vastaavien mittaus-tietojä ei ollut saatavilla, arvioitiin kiihtyvyyden olevan maksimissaan 70 g mittauskohteesta riippumatta. Riittävän spesifikaation omaavia antureita olisi ollut saatavilla kuluttajamarkkinoilla, mutta niiden hinta oli liian suuri tämän työn budjettiin. Anturit olisivat maksaneet noin 600 euroa kappale, ja tarve mittauksen suorittamiseksi oli vähintään viidelle anturille.

Opinnäytetyön ohjaajan ja tilaajan kanssa käydyn keskustelun jälkeen kävi ilmi, että anturit olisi mahdollista valmistaa myös itse. Päätettiin, että tilataan tarvittavat komponentit Yhdysvalloista ja valmistetaan piirilevy Oamkin protopajalla. Anturien koteloinnin valmistaminen oli myös mahdollista toteuttaa konetekniikan laboratorioden välineillä. Valittiin käytettäväksi komponentiksi Analog Devicesin valmistama kaksiakselinen kiihtyvyysskide ADXL278 (12). Vaikka tässä työssä mitattiin ainoastaan pystyakselin suuntaista kiihtyvyyssiätöä, otettiin anturien suunnittelun perustaksi se, että niitä voitaisiin käyttää myös jatkossa Oamkin laboratoriossa tehtävissä erilaisissa mittauksissa.

4.1 Elektroniikka

Komponenttien tilaus, piirilevyn suunnittelu, valmistus ja komponenttien ase-mointi sekä anturien elektroniikan kokoonpano toteutettiin yhteistyössä projekti-suunnittelija Henry Hinkulan kanssa.

Piirilevy suunniteltiin CadSoft Eagle 7.2.0 -ohjelmalla. Aluksi piirrettiin kytkentä-kaavio kiihtyvyysskiteen teknisten tietöjen perusteella (liite 1). Tämän jälkeen suunniteltiin itse piirilevy, jonka lopullisiksi mitoiksi tuli 12,7 x 17,8 mm (liite 2). Piirilevyt jrsittiin LKPF Protomat S100 -jrsimellä. Materiaalina levyissä käytet-tiin 1,6 mm yksipuoleista FR-4-lasikuitulevyä, jossa kuparikerroksen vahvuus oli 35 µm.

Kun piirilevyt oli jrsitty, ne pastoitettiin mikropalloisella lyijyttömällä juotospas-talla AIM NC 257-2. Komponentit asemoitiin pastan päälle käsin mikroskoopin

avulla ja juotettiin Metcal-pintaliitostyöasemalla. Käytettäväksi johtimeksi valittiin teolliseen käyttöön tarkoitettu CAT 5E flex -kaapeli.

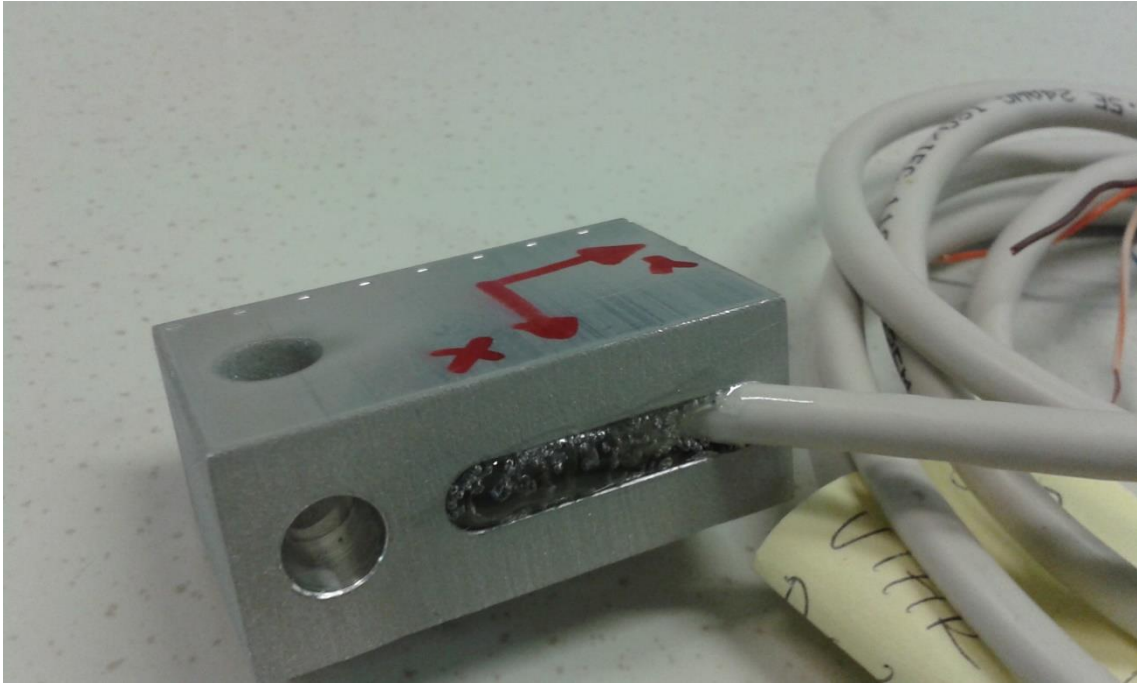
4.2 Kotelointi

Kun piirilevyn prototyyppi oli tehty, pidettiin kotelointiin liittyvä suunnittelupalaveri laboratorioteknikko Jari Mahlakaarron ja Henry Hinkulan kanssa. Anturien kotelointiratkaisuksi valittiin alumiinikotelo, johon tehtäisiin taskujyrsintä elektronikan sijoittamista varten sekä kahden akselin suuntaiset läpiporaukset anturin kiinnitystä varten. Kotelo mallinnettiin SolidWorks 3D -mallinnusohjelmalla. Samalla kotelosta tehtiin DXF-tiedostot, joiden avulla voitiin ohjelmoida työstökoneille tarvittavat toimenpiteet.

Kotelon prototyypin aihio leikattiin Fin-Jet Muototerä L3015 -vesileikkausjärjestelmällä 20 mm alumiinilevystä ja samalla tehtiin toisen akselin suuntainen reikä kiinnitystä varten yhteistyössä Jari Mahlakaarron kanssa. Tämän jälkeen taskujyrsintä ja pystyakselin suuntainen poraus tehtiin 5-akselisella pystykaraisella työstökeskuksella Haas UMC-750.

4.3 Kokoonpano ja testaus

Elektronikan kiinnittämismenetelmäksi koteloon valittiin tyhjiövalu hartsilla. Aluksi piirilevy kiinnitettiin pikaliimalla alumiinikoteloon tehdyn taskujyrsinnän pystyseinämään. Tämän jälkeen kotelo levyineen kiinnitettiin viilapenkkiin. Hartsi sekoitettiin Sancron C-002 -tyhjiövalukoneessa, minkä jälkeen valu suoritettiin kaatamalla hartsi viilapenkkiin kiinnitetyn anturin taskuun. Hartsin annettiin kovettua vuorokausi (kuva 4).



KUVA 4. Valmis kiihtyvyyssanturi

Valmis prototyyppianturi testattiin Oamkin protopajalla oskilloskoopilla mitaten ja havaittiin, että ratkaisu on toimiva. Tämän jälkeen valmistettiin viisi anturia edellä mainittuja menetelmiä käyttäen. Lopputuloksena saatiin kuusi kiihtyvyyssanturia, joista yhtä käytettäisiin vertailuanturina mittaustulosten oikeellisuuden varmistamiseksi.

Kiihtyvyyssantureiden toiminta tarkastettiin 8.5.2015 kiinnittämällä ne EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyn kierretankoa apuna käyttäen päällekkäin ja suorittamalla tiedonkeruu yhdestä värähtelyjaksosta (kuva 5). Havaittiin, ettei 50 Hz:n näytteenottotaajuus antanut riittävän tarkkoja tuloksia. Antureita testattiin nostamalla näytteenottotaajuutta 50 Hz:n välein kullekin anturille, kunnes saavutettiin MoTeC ADL 2:n maksimi 500 Hz:n taajuus / anturi. Havaittiin, että 500 Hz:n näytteenottotaajuus antaa riittävän tarkat tulokset analysointia varten. Kyseisellä taajuudella mittaustuloksia ei tarvitse ohjelmallisesti suodattaa, vaan tarkkuus on suodattamattomana hyvä analysointia varten (liite 5).



KUVA 5. Antureiden vertaus

5 MITTAUSJÄRJESTELYT

Tutkimuksessa mitattiin EUSAMA-testilaitteen tuottaman pakkovärähtelyn seurauksena aiheutuva ajoneuvon pyörätuennan ja korin kiihtyvyys sekä asema ajan suhteen. Myös EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyn siirtymä ja kiihtyvyys mitattiin, jotta nähtiin kuinka ilmakumirengas vaikuttaa värähtelyyn. Tulosten perusteella oli myös mahdollista määrittää nopeudet kyseisille kohteille, koska nopeus on siirtymän aikaderivaatta.

Mittaukset toteutettiin 11. ja 12.5.2015 Oamkin autolaboratoriossa. Laboratoriossa on EUSAMA-periaatteella toimiva pyöräkosketusmittauslaite, jonka rinnalle kytkettiin korin, pyörätuennan ja testilaitteen liikettä mittaavat laser asemaanturit. Kyseisistä kolmesta kohteesta mitattiin myös kiihtyvyystieta.

Mittaukset tehtiin yhdelle ajoneuville kunnossa ja epäkunnossa olevilla iskunvaimentimilla. Näin saatiin vertailupohja tuloksille. Ajoneuvossa ei mittaushetkellä ollut kuljettajaa tai muutenkaan ylimääräistä kuormaa.

5.1 Tutkittava ajoneuvo

Tutkittavana ajoneuvona työssä oli Opel Vectra C Caravan 2.2 Direct (Z 22 YH), vuosimallia 2004. Ajoneuvon jousitus oli toteutettu kullekin pyörälle kierrejousella ja iskunvaimentimella. Renkaina ajoneuvossa oli Continental ContiPremium-Contact 205/60R16 -kesärenkaat. Rengasilmanpaineena mittauksessa käytettiin 2,0:ta bar.

Autossa paikallaan olleet iskunvaimentimet ja jouset olivat todennäköisesti huonokuntoiset ajotuntuman perusteella. Ajettaessa tiessä olevaan herätteeseen, kuten hidastetöyssyyn, auton etu- ja taka-akseli jäi heilahtelemaan. Kunnossa olevan jousituksen käyttäytymisen tulisi olla sellainen, että tasapaino-asemasta poiketessaan pyörätuenta palaa lähes heti takaisin tasapaino-asemaansa.

5.2 Mittausmenetelmä

Jousituksen toimintaa oli mahdollista tarkastella mittaamalla liike ja kiihtyvyys pyöräntuennasta, ajoneuvon korista ja testilaitteen värähtelylevystä. Ajoneuvoa

ei tarvinnut liikuttaa saman akselin mittausten välillä, vaan pyöräkosketusmittalaitteella oli mahdollista tehdä mittaustason toisto useita kertoja peräkkäin.

Pyörätuennan liikkeen mittausta varten toteutettiin omana projektinaan yleisimmille vannetyypeille soveltuva mittaustaso, joka kiinnitetään ajoneuvon vanteen ulko- tai sisäreunaan (kuva 6). Kyseisessä laitteessa on säädettävä metallitaso, jota heijastuspintana käyttämällä varmistetaan luotettava pyörätuennan aseman mittaustaso. Mittaustaso mallinnettiin SolidWorks 3D -mallinnusohjelmalla, minkä jälkeen se kokoonpantiin Oamkin konetekniikan laboratorion tiloissa.



KUVA 6. Vanteeseen kiinnitettävä mittaustaso

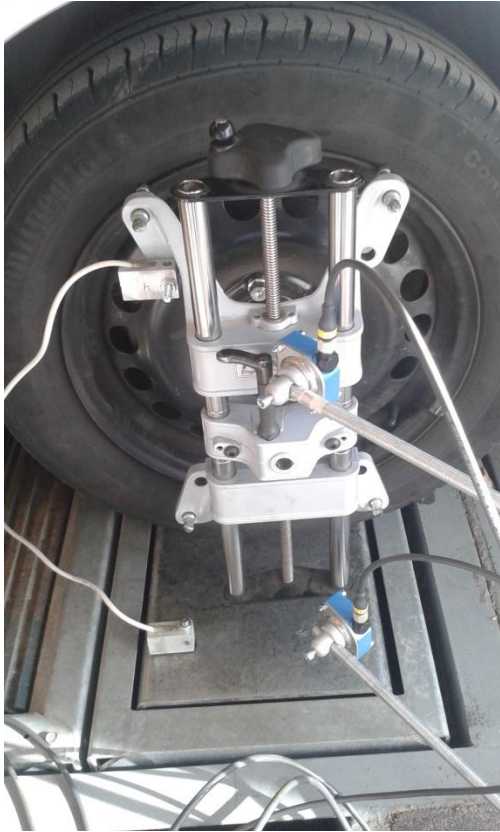
Pyörätuennan aseman mittaustaso olisi mahdollista toteuttaa myös siten, että laser kohdistettaisiin tietyssä kulmassa kohteeseen, minkä jälkeen tiedonkeruuhjelmiston laskentaa käyttämällä saataisiin siirtymä pysty akselilla määritettyä. Tämä ei kuitenkaan ole tarkka menetelmä, koska vanteessa olevat pyöreät muodot saattavat aiheuttaa laskennan vääristymisen.

Mittaustasojen valmistelun aikana havaittiin, ettei suunniteltu mittaustaso ollut täysin jäykästi kiinni ajoneuvon vanteessa, vaan se pääsi liikkumaan värähtelyn vaikutuksesta (kuva 7).



KUVA 7. Mittaustaso kiinnitettynä vanteeseen

Mittausepätkarkkuuden parantamiseksi mittaustasona käytettiin Hunter -nelipyöräsuuntauslaitteen tunnistimien vannekiinnittimiä. Kiinnittimet asettuivat paikoilleen tiukasti, eivätkä ne päässeet liikkumaan värähtelyn aikana (kuva 8).



KUVA 8. Mittaustaso antureineen

Ajoneuvon korin, pyörien ja EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyjen pystyakselin suuntaista siirtymää mitattiin laser asema-antureilla. Anturit kiinnitettiin statiiveihin, joiden avulla ne asemoitiin tarvittaviin mittauskohteisiin. Korin liikkeen ja kiihtyvyyden mittauksessa käytettiin lukkopeltiin kiinnitettyä teräslevyä, joka asemoitiin vesivaa'an avulla suoraan (kuva 9). Kiihtyvyyssanturi kiinnitettiin mittauksessa käytetyn teräslevyn kiinnityspultin avulla.



KUVA 9. Korin kiihtyvyys ja asema edessä

Taka-akselilla siirtymä mitattiin vetokoukussa olevasta tasopinnasta (kuva 10). Kiihtyvyyssanturi kiinnitettiin tavaratilan pohjan pystysuorassa oleviin peltirakenteisiin pulttikiinnityksellä.



KUVA 10. Korin kiihtyvyys ja asema takana

EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyn siirtymä oli mahdollista mitata koh-tisuoraan kyseisestä levystä. Kiihtyvyyssanturit sijoiteltiin EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyihin, pyörätuennan mittaustasoihin ja koriin (liite 4).

Mitattavan kohteen liiketaajuus oli maksimissaan 25 Hz, josta se laski testijak-son loppuun mennessä 0 Hz:iin. Luotettavien tulosten saavuttamiseksi tuli antu-reiden näytteenottotaajuuden olla siis vähintään kaksinkertainen. Liian alhainen näytteenottotaajuus olisi aiheuttanut sen, että siirtymien ja kiihtyvyyksien kuvaa-jat eivät olisi olleet luotettavia. Tiedonkeruujärjestelmää testattaessa havaittiin, että luotettavimmat mittaustulokset saatiin käyttämällä MoTeC ADL 2:n kanava-kohtaista maksiminäytteenottotaajuutta 500 Hz. Kaikilla mitta-antureilla käytet-tiin mittauksessa 500 Hz:n näytteenottotaajuutta.

Mittaukset kunnossa oleville ja epäkuntoisille iskunvaimentimille tehtiin kolme kertaa kummallekin akselille. Autosta mitattiin ensin etuakseli, minkä jälkeen tavallisesta testauksesta poiketen, auto käännettiin ja peruutettiin värähtelylevy-jen päälle taka-akselin mittaamiseksi. Mitta-antureiden annettiin olla paikoillaan, joten taka-akselin osalta oikea ja vasen puoli ovat toisin päin. Tiedonkeruussa kanavan nimenä on esimerkiksi ”Wheel Right”, mutta mittaustulos on vasem-man takapyörätuennan (liitteet 11 ja 15).

5.3 Mittausvälineet

Tutkimuksessa käytettiin seuraavia välineitä:

- laseranturi Wenglor CP08MHT80
- omavalmisteinen kiihtyvyyssanturi ADXL278
- EUSAMA-testilaite
- kolme statiivia
- vesivaaka
- työntömitta
- Hunter-nelipyöräsuuntauslaitteen vannekiinnitin
- MoTeC ADL 2
- kannettava tietokone, jossa on MoTeC i2 Pro Data Analysis -ohjelmisto ja MoTeC ADL 2 Dash Manager -ohjelmisto.

5.4 Tiedonkeruu

Tiedonkeruu antureilta suoritettiin kannettavalla tietokoneella MoTeC ADL 2:ta käyttäen. Valmistaja ilmoittaa kyseiselle laitteelle 500 Hz:n näytteenottotaajuuden käytettäessä analogista jännitteen sisääntuloa (13). Tässä tiedonkeruussa käytettävien antureiden näytteenottotaajuus tuli olla vähintään 50 Hz / anturi, mutta mittauslaitteiston testauksen jälkeen päädyttiin käyttämään 500 Hz / anturi kullekin anturille. Mittaus suoritettiin käyttämällä viittä laseranturia ja kuutta kiihtyvyyssanturia. Tiedonsiirto toteutettiin langallisena mahdollisten tiedonsiirtovirheiden minimoimiseksi.

Mitattujen arvojen analysointiin käytettiin MoTeC i2 Pro -tiedon analysointiohjelmistoa. Kyseisen ohjelmiston käyttöliittymä on graafinen ja ohjelmisto mahdollistaa myös erilaisten matemaattisten toimenpiteiden tekemisen.

5.4.1 ADL 2:n alustus

ADL 2 -tiedonkeruulaitetta varten tehtiin asetustiedosto MoTeC ADL 2 Dash Manager -ohjelmalla. Kyseiseen asetustiedostoon määritettiin käytettävät analogiset mittauskanavat, niiden näytteenottotaajuudet, mittayksiköt ja nimet. Valmis tiedosto ladattiin ADL 2:een. Tässä vaiheessa olisi myös ollut mahdollista

tehdä mitatuille arvoille automaattista laskentaa ja suodatusta, mutta niitä ei tehty, koska työssä haluttiin käyttää ainoastaan mitattuja arvoja.

5.4.2 Johtosarjan valmistus

Tiedonkeruulaitteen kytkemiseksi mitta-antureihin ja tiedon siirtämiseksi kannettavalle tietokoneelle, täytyi valmistaa johtosarja tähän tarkoitukseen. Ennen valmistusta suunniteltiin kytkennät ADL 2 -tiedonkeruulaitteeseen (liite 3). Johtosarja valmistettiin Oamkin autolaboratoriossa 8.5.2015. Johtosarjan toiminta testattiin välittömästi sen valmistuksen jälkeen kiihtyvyyssantureiden vertailussa (liite 5).

5.4.3 Konfigurointi ja kalibrointi

MoTeC ADL 2 konfiguroitiin mittauksia varten. Laitteelle täytyi siis kertoa, mitä sisääntulokanavia käytetään ja millä näytteenottotaajuudella tiedot kerätään. Laitteen konfigurointiohjelmistolla oli mahdollista esimerkiksi määrätä analogisten sisääntulojen jännitteen vaihtelualue ja tehdä anturien kalibrointi. Konfigurointi tehtiin käyttäen antureiden teknisiä spesifikaatioita.

Anturit täytyi myös kalibroida ennen jokaista mittauksia. Kiihtyvyyssanturien kalibrointi tehtiin määrittämällä nollakohta ohjelmallisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että anturin ulostulosignaalin tietty millivolttimäärä kuvaa tilannetta, jossa ei ole kiihtyvyyttä eikä hidastuvuutta.

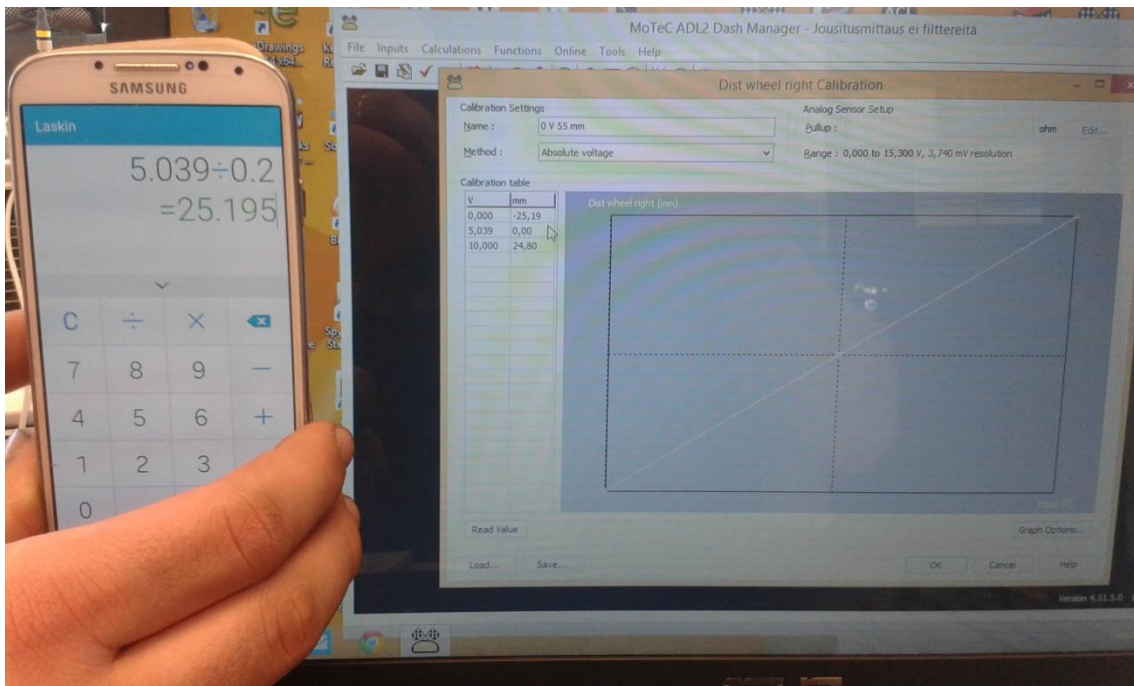
Myös laser asema-anturien nollakohta täytyi määrittää erikseen jokaiselle mittaukselle. EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyä ohjataan mekaanisesti epäkeskoakselilla, joten kunkin testijakson alussa se oli hieman eri kohdassa. Anturien mitta-alue oli 30...80 mm mitattuna anturin reunasta (14). Anturit asetettiin ensin työntömittaa apuna käyttäen siten, että mitattava kohde oli anturin mitta-alueen keskellä, eli 55 mm:n etäisyydellä anturin reunasta. Valmistaja ilmoitti, että anturi toimii lineaarisesti 0...10 V alueella, joten karkean säädön jälkeen anturin antaman ulostulojännitteen avulla voitiin määrittää mitta-alueen ääriarvot ADL 2 Dash Manager -ohjelmalla. Esimerkiksi 50 mm mitta-alue 0...10 V jännitteen ulostulolla tarkoittaa 0,2 V / mm. Kun anturi näytti karkean säädön jälkeen

jänniteulostulon 4,332 V, saatiin mitta-alueen ääriarvot kalibrointua määrittämällä ne seuraavasti (kuva 11):

$$\text{Ääriarvo alas} = \frac{(0 \text{ V} - 4,332 \text{ V})}{0,2 \text{ V/mm}} = 21,66 \text{ mm}$$

$$\text{Ääriarvo ylös} = \frac{(10 \text{ V} - 4,332 \text{ V})}{0,2 \text{ V/mm}} = 28,34 \text{ mm}$$

$$\text{Tark.} = 21,66 \text{ mm} + 28,34 \text{ mm} = 50,00 \text{ mm} .$$



KUVA 11. Kalibrointi ohjelmallisesti

5.5 Virheen arviointi

Virhettä mittaustuloksiin aiheuttavat mittaustuloksiin ominaiset systemaattiset virheet sekä satunnaiset virheet. Satunnaiset virheet mittaustuloksiin aiheutuvat esimerkiksi mitta-antureiden virheellisestä suuntauksesta ja testiradan mekaanisten osien kulumisesta. Satunnaiset virheet ovat usein mittauksen suorittajan aiheuttamia.

Arvioidaan ADL 2 ja ADXL278 valmistajien ilmoittamien lineaarisuusarvojen perusteella virheet kiihtyvyyden ja siirtymän tiedonkeruulle. MoTeC ilmoittaa

ADL 2 analogisten 0...15,3 V ja 0...5,5 V sisäänmenojen lineaarisuuden olevan ± 6 mV (6). Voidaan siis arvioida ADL 2:n virhettä seuraavasti:

$$\text{Virhe}_{0...15,3V} = \frac{(0,006 V \cdot 2)}{15,3 V} = 0,000784 \approx 0,08 \%$$

$$\text{Virhe}_{0...5,5V} = \frac{(0,006 V \cdot 2)}{5,5 V} = 0,002182 \approx 0,2 \%$$

Analog Devices ilmoittaa ADXL278 (AD22286) kiihtyvyysskiteelle epälineaarisuuden maksimiarvoksi 2,0 % (15). Kiihtyvyysskiteen mitta-alue on 0...5 V, joten kokonaisvirhe mitatulle kiihtyvyydelle voidaan arvioida seuraavasti:

$$\text{Kiihtyvyyden virhe} = 0,2 \% + 2,0 \% = 2,2 \%$$

$$\rightarrow 15 - \text{yksikön säännöllä} = \mathbf{3,0 \%}$$

Wenglor ilmoittaa CP08MHT80-laseranturille lineaarisuudeksi 0,2 % (16). Kun yhdistetään tähän ADL 2:n virhe, arvioitu kokonaisvirhe on:

$$\text{Siirtymän virhe} = 0,08 \% + 0,2 \% = 0,28 \%$$

$$\rightarrow 15 - \text{yksikön säännöllä} = \mathbf{0,3 \%}$$

6 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY

Tiedonkeruusta saadut mittaustulokset analysoitiin MoTeC i2 Pro -analysointiohjelmistolla. Kukin mittausta suoritettiin kolme kertaa, jotta voitiin vertailla tulosten samankaltaisuutta. Saatuja tuloksia eri mittauskerroilta oli haastavaa verrata matemaattisin keinoin, koska verrattavien tulosten vaihe-erot ja amplitudit vaihtelevat mittausjakson aikana.

Mittausten toistettavuus oli korkea. Autoa tai mitta-antureita ei ollut tarvetta liikuttaa lainkaan toistettaessa mittausta. Toisto onnistui suoraan Bosch-testiradan ohjauksen kautta.

Tarkasteltavat mittausjaksot rajattiin siirtymien arvoista MoTeC i2 Pro -ohjelmistolla Beacon-toiminnon avulla siten, että EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyn poiketessa ensimmäisen kerran tasapaino-asemastaan asetettiin se alkuhetkeksi. Loppuhetki määritettiin kohtaan, jossa värähtelylevyn liike lakkaa lähes kokonaan. Tämä toimenpide tehtiin aluksi yhdelle värähtelyjaksolle, josta kirjattiin muistiin kesto-aika 16,473 s. Muille tiedonkeruun tiedostoille rajaus tehtiin määrittämällä aloitusajankohta edellä mainitulla tavalla, minkä jälkeen käytettiin kirjattua kesto-aikaa jakson pituuden määrittämiseen. Näin kaikki vertailtavat jaksot saatiin keskenään samankaltaisiksi (liite 6).

Laser asema-antureilla mitatut siirtymät olivat hyvin tarkkoja (liitteet 13 - 16). Tämä osoittaa työssä käytettyjen laserantureiden korkean laadun ja tarkkuuden. Lasereilla mitatut EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyjen 6 mm liikkeet pystysuunnassa näkyvät mittaustuloksissa hyvin tarkasti (liite 7).

Kiihtyvyyssmittausten tuloksista havaittiin, että antureiden mitta-alue oli riittänyt ainoastaan värähtelylevyjen ja korin kiihtyvyyksien mittaukseen. Pyörätuennan kiihtyvyyksien huiput olivat leikkaantuneet pois (liite 8). Tämä ratkaistiin derivoimalla pyörätuennan kiihtyvyys pyörätuennan siirtymän arvoista. Mitattuja ja laskennallisia tuloksia verrattiin ja havaittiin, että ne ovat lähes samat. Laskennallista kiihtyvyyden arvoa voidaan pitää tämän työn puitteissa riittävän luotettavana. Oikean etupyörän kiihtyvyydet testijakson aikana muuttuivat huomattavasti vanhojen ja uusien iskunvaimentimien välillä. Koska saadut tulokset eri

mittauskerroilla olivat lähes samanlaisia, verrataan etuakselin osalta ensimmäisiä mittauksia ja taka-akselin osalta toisia mittauksia vanhojen ja uusien pyörätuennan osien välillä. Laskennalliset kiihtyvyydet on esitetty liitteissä 9 - 12.

EUSAMA-testilaitteen antamat mittaustulokset kirjattiin jokaisella mittauskerralla. Tulokset on esitetty taulukossa 1. Mittaustulos näyttää oikealla edessä tapahtuneen 20,9 % ja vasemmalla edessä 15,7 % muutoksen. Kun tarkastellaan kiihtyvyyksien arvoja edestä oikealta ja vasemmalta, ei oikean ja vasemman puolen ero uusien ja vanhojen osien välillä ole EUSAMA-testilaitteen antaman tuloksen kaltainen. Kiihtyvyyden perusteella oikean etuiskunvaimentimen vaimennuskyky on ollut todella huono. Tämä havaitaan, kun verrataan edestä oikean ja vasemman puolen pyörätuennan ja korin kiihtyvyyksiä.

Taka-akselin tuloksista huomataan, että oikealla on tapahtunut 14,2 % ja vasemmalla 11,4 % muutos. Taka-akselin kiihtyvyyksien tuloksissa ei näy huomattavia eroja, mutta siirtymän tuloksissa on havaittavissa selkeä ero uusien ja vanhojen osien välillä.

TAULUKKO 1. EUSAMAn mittaustulokset

Mittaus	Etuakseli (vanhat)		Etuakseli (uudet)		Taka-akseli (vanhat)		Taka-akseli (uudet)	
	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen
1	58	59	71	68	57	63	66	70
2	55	56	70	68	56	62	66	70
3	54	57	70	68	56	62	65	71
Ka.	55,7	57,3	70,3	68,0	56,3	62,3	65,7	70,3
Ero, uudet / vanhat (%)			20,9	15,7			14,2	11,4

Tuloksia analysoidessa havaittiin, että oikeasta etupyörätuennasta mitattu kiihtyvyys vanhalla iskunvaimentimella sisälsi korkeataajuista värähtelyä. Aluksi luultiin, että kyseessä on mittausvirhe, mutta verratessa samalla anturilla tehtyä mittausta uudelle vaimentimelle, korkea taajuus oli poistunut kiihtyvyyden kuvaajasta. Korkeataajuinen vaihtelu signaalissa johtunee siitä, että huonosti vaimentava iskunvaimennin alkaa resonoida EUSAMA-testilaitteen värähtelytaajuuden monikerralla.

Kiihtyvyyssarvojen vertaamiseksi tehtiin kiihtyvyyden arvoille nopea Fourier'n muunnos, joka mahdollisti tulosten tarkastelun taajuustasossa (liitteet 17 - 20). Oikealla edessä korkeataajuiset värähtelyt (yli 170 Hz) vaimentuivat lähes kokonaan uudella iskunvaimentimella. Myös matalataajuiset värähtelyt ovat vaimentuneet. Vasemmalla takana voitiin havaita sama ilmiö.

7 YHTEENVETO

Työn lähtökohtana oli tarve saada tarkkaa tietoa ajoneuvon jousituksen kunnosta. Työn tavoitteena oli tutkia, onko mahdollista määrittää henkilöauton iskunvaimentimien kunto niin, että ne ovat kiinteästi asennettuna ajoneuvoon. Mittaukset suoritettiin samantyyppisellä laitteella kuin katsastustoimipaikoilla. Tällä opinnäytetyöllä ei ollut erillistä tilaajaa, vaan kyseessä oli työn tekijän oma innovaatio iskunvaimentimien testauksen kehittämistä ja tieturvallisuuden parantamisesta.

Työssä havaittiin, että iskunvaimentimen kunto on mahdollista määrittää kiihtyvyydenmittauksen perusteella. Kun värähtelyjaksolta mitatuille kiihtyvyyden arvoille tehtiin FFT-muunnos, oli tuloksista nähtävissä eri taajuuksilla esiintyvien värähtelyjen vaimeneminen. Tässä on oletuksena se, että käytetty testirata on asianmukaisesti tarkastettu ja kalibroitu. Myös siirtymien mittaustuloksista on havaittavissa muutoksia vanhojen ja uusien pyörätuennan osien välillä. Tässä työssä siirtymien arvoja käytettiin laskettaessa kiihtyvyyden arvot pyörätuennalle ja värähtelylevylle. Kiihtyvyydsantureiden mitta-alue ei riittänyt mittauksiin. On kuitenkin otettava huomioon, ettei vastaavasta mittauksesta ollut saatavilla tietoja, joten kiihtyvyyksien arvot täytyi olettaa antureita suunniteltaessa.

Lisäksi aiheesta voisi tehdä jatkotutkimusta niin, että otettaisiin huomioon ajoneuvon korin jokaisen akselin suuntaiset liikkeet sekä pyöriin kohdistuvat voimat. Aihe on hyvin laaja, mutta tutkimiseen tarvittava tekniikka on olemassa. Korin liikkeitä voitaisiin tutkia gyroskoopin avulla, riittävän nopealla näytteenototaajuudella. Ajoneuvon ei täytyisi tässä tapauksessa olla paikallaan testilaitteen päällä, vaan sillä voitaisiin ajaa normaaleissa ajotilanteissa samanaikaisesti tietoa keräten. Kyseisen tutkimuksen mittaustuloksia voitaisiin analysoida erinomaisesti MoTeC i2 Pro -ohjelmistolla. Lisäksi voitaisiin selvittää, voidaanko jousitustestauksen nykytilaa kehittää lisäämällä kiihtyvyydenmittaus pyörätuennalle ja korille ja antaisiko se lisäarvoa jousituksen kunnan määrittämiseen.

Tutkimuksessa havaittiin myös, että siirtymän mittauksella on mahdollista tarkastaa myös itse testiradan toimintaa. Mitatuista arvoista nähdään, onko väräh-

telylevyn siirtymä vaatimusten mukainen ± 6 mm ja millä taajuudella värähtelylevy toimii.

Tässä työssä oli tarkoitus verrata korin ja pyörätuennan välistä vaimenemaa. Työn aikana tehtiin kuitenkin havainto, että pyöräntuennan kiihtyvyyden muutoksen tarkastelulla voidaan tehdä johtopäätöksiä vaimentimen kunnosta. Tämä tarkastelu vaatii kuitenkin vertailuarvot, joina tässä työssä olivat uusilla vaimentimilla saadut mittaustulokset.

Virhettä mittauksiin aiheuttavat systemaattiset ja satunnaiset virheet. Satunnaisista virheistä mainittakoon EUSAMA-testilaitteen värähtelylevyjien epäkeskoneiston kunto, kiihtyvyydsantureiden tarkka mittaussakselin suuntainen aseointi, vesivaa'an virhe, statiivien värähtely ja erot rengasilmanpaineissa ja renkaissa. Tästä työstä saatuja tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina mahdollista jatkotutkimusta ajatellen.

LÄHTEET

1. Värähtelymekaniikka. Sessio 01: Johdanto, peruskäsitteitä, laskentamallit. DIGMA. Avoin yhteisöllinen oppimisympäristö. Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F4nd6W/VMS01.pdf>. Hakupäivä 18.11.2014.
2. Laine, Olavi 1970. Autotekniikka II osa. Tapiola: Kustannusyhtymä Tampere.
3. Hyvärinen, Veikko – Mattila, Pekka – Mylläri, Atte – Rantala, Jouko – Sirola, Jarkko 2002. Auto- ja kuljetusalan erikoistumisoppi 1. Keuruu: Otava.
4. Kaikki iskunvaimentimista. 1993. Monroe.
5. Autoteknillinen taskukirja. 1984. Robert Bosch GmbH. Suom. Seppo K.J. Eronen. Jyväskylä: Gummerus.
6. Buekenhoudt, Pascal 2011. Minimum phase shift. CITA 2011 -konferenssi 2011. Berliini: GOCA.
7. Katsastuksen ohjeet. 2015. TraFi. Liikenteen turvallisuusvirasto. Saatavissa: <http://www.trafi.fi/filebank/a/1414581757/ec3c2b57482ee059e6b6137126c09cbd/15917-Henkilo- ja pakettiautojen heilahtelunvaimentimien testauslaite.pdf>. Hakupäivä 3.3.2015.
8. Ojala, Iiro 2014. Testiradan toimintavarmuuden parantaminen. Opinnäytetyö. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu, auto- ja kuljetustekniikka, Auto- ja korjaamotekniikka. Saatavissa: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/71089/Ojala_Iiro.pdf.pdf?sequence=1. Hakupäivä 15.11.2015.
9. Lehtinen, Arto 2014. Arena-testirata luentomateriaali. Saatu käyttöön toimitusjohtaja Arto Lehtiseltä Diagno Finland Oy:lta 3.3.2015.
10. Lehtinen, Arto 2014. Vaimentimien mitta-arvojen tulkinta. Saatu käyttöön toimitusjohtaja Arto Lehtiseltä Diagno Finland Oy:lta 3.3.2015.

11. Bäck, Mikael 2011. YKL:n jäsenyritysten mittalaiteselvitys. Opinnäytetyö.
Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka. Saatavissa:
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/27222/Back_Mikael.pdf?sequence=1. Hakupäivä 24.11.2015.
12. ADXL278. Technical Documentation. Data Sheets. Analog Devices. Saatavissa: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL278.pdf>. Hakupäivä 7.11.2015.
13. MoTeC. Engine Management & Data Acquisition Systems. User Manuals. Saatavissa: <http://www.motec.com.au/downloads/downloadmanuals/>. Hakupäivä 3.3.2015..
14. CP08MHT80. High-Performance Distance Sensors. Wenglor. Saatavissa: https://www.wenglor.com/wenglor/catalog/productDetail.jsf?area=0000126227&sort=ID&wec-ap-pid=Shop_1000_EXT_EN&page=5D71B2CFF23C4B099BB65087B96A040C&itemKey=CP08MHT80&show=12&view=row&wec-locale=en_US. Hakupäivä 7.11.2015.

LIITTEET

Liite 1 Kiihtyvyysskiteen kytkentäkaavio

Liite 2 Kiihtyvyyssanturin piirilevy

Liite 3 ADL 2:n kytkentäkaavio

Liite 4 Antureiden sijoittelu

Liite 5 Kiihtyvyyssantureiden vertaus

Liite 6 Mittajaksojen rajaus

Liite 7 EUSAMA liikematka

Liite 8 Mitattu ja laskettu kiihtyvyys

Liite 9 Kiihtyvyydet oikealla edessä

Liite 10 Kiihtyvyydet vasemmalla edessä

Liite 11 Kiihtyvyydet vasemmalla takana

Liite 12 Kiihtyvyydet oikealla takana

Liite 13 Siirtymät oikealla edessä

Liite 14 Siirtymät vasemmalla edessä

Liite 15 Siirtymät vasemmalla takana

Liite 16 Siirtymät oikealla takana

Liite 17 Fourier-muunnetut kiihtyvyydet oikealla edessä

Liite 18 Fourier-muunnetut kiihtyvyydet vasemmalla edessä

Liite 19 Fourier-muunnetut kiihtyvyydet vasemmalla takana

Liite 20 Fourier-muunnetut kiihtyvyydet oikealla takana

